



特集 植生のリモートセンシング

3次元リモートセンシングによる森林構造の計測と解析

細井 文樹*・大政 謙次

東京大学大学院農学生命科学研究科

3-D remote sensing for measurement and analysis of forest structure

Fumiki Hosoi and Kenji Omasa

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

要旨：森林群落のもつ3次元構造は、森林生態系の機能を維持するためにきわめて重要な役割を果たしている。近年、スキャニングライダー（Light Detection And Ranging: LiDAR）を用いた3次元リモートセンシングにより、森林構造の計測が行われるようになってきた。スキャニングライダーは森林の3次元点群データを取得可能な装置で、得られたデータをもとに、様々な森林構造パラメータを算出することが可能である。本稿ではスキャニングライダーシステムを使った森林構造計測の概要について、具体的な応用事例を交えながら紹介する。応用事例としては、森林の3次元構造を表す指標の一つである葉面積密度の垂直分布の推定法について紹介する。本方法では、可搬型スキャニングライダーデータをもとにレーザービームの光跡をトレースし、その情報を用いてボクセルモデリングを行い、得られたモデルからレーザービームの衝突頻度を計算し、その垂直分布を算出する。さらにもう一つの事例として、可搬型スキャニングライダーデータを用いた樹木の材積の推定法について紹介する。本方法では、落葉期にライダーによる計測を行い、得られたデータから、幹や枝の内部を充填するソリッドボクセルモデリングを行い、ボクセル数をカウントすることにより、任意の部位の材積の推定を行う。これらの方法を広葉樹群落に適用した場合の結果について述べる。

キーワード：群落構造、材積、スキャニングライダー、ボクセルモデル、葉面積密度

はじめに

森林は複雑な3次元構造を有し、その構造によって森林内部の光環境や微気象が変化し、森林の成長やそこに生息する動植物に影響を及ぼす。そのため、森林生態系の機能を解明するうえで、森林群落の3次元構造を効率よく正確に計測し、その変化をモニタリングする方法を開発することは、極めて重要な課題である（大政ほか2009）。これまで様々な方法で森林構造の計測がなされてきた。直接的な方法としては、メジャー等を用いた毎木調査や、葉を高さごとにサンプリングし、葉面積密度（Leaf Area Density: LAD）の垂直分布や葉面積指数（Leaf Area Index: LAI）を出す層別刈取り法などがある。こうした直接的な方法は計測の労力が大きく、しばしば破壊計測を

伴う点などが、実際の森林での実施において問題となる。破壊計測を伴わない間接的方法としては、樹冠を透過してくる太陽光を計測し、その透過率からLADやLAIを出すGap fraction法がある（Welles and Cohen 1996）。この方法では透過率の情報が自動的に記録されるため、非常に効率よく樹冠構造の計測が可能であるが、葉の空間分布に起因する推定値の誤差や、計測時の光条件の制約などが問題となる。一方、人工衛星搭載のマルチスペクトルセンサー、合成開口レーダーなどを利用したリモートセンシングによる森林構造計測の研究も数多く報告されている（Goward and Williams 1997; Papathanassiou and Cloude 2001）。これらは広域情報の取得には優れているが、精度の点で問題がある。

近年、森林の3次元構造計測に、スキャニングライダーが活用されるようになってきた。スキャニングライダーとは、レーザービームを対象にスキャン照射し、その

2013年11月29日受付、2014年3月30日受理

*e-mail: ahosoi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

反射光を検出し、対象までの距離を算出することで、対象の3次元点群画像データを得る装置である。スキャニングライダーには航空機搭載型と可搬型があり、前者は広域の計測に、後者はプロットレベルの高精度計測に用いられる。これらの装置を用い、森林の樹高やバイオマス、LAD分布などを効率よく正確に推定することが可能となってきた (Means et al. 1999 : Omasa et al. 2000, 2002, 2003, 2007, 2008 : Hyyppä et al. 2001 : Lefsky et al. 2002 : Brandtberg et al. 2003 : Holmgren and Persson 2004 : Næsset et al. 2004 : Hosoi and Omasa 2006, 2007 : Hosoi et al. 2010, 2013 : Zhao et al. 2011)。

本稿では、スキャニングライダーを使用した森林の3次元リモートセンシング計測法について解説するとともに、事例研究として、筆者らの研究を中心に、可搬型スキャニングライダーによる高さ毎のLADと材積を算出する方法について解説する。

航空機搭載型スキャニングライダーの特徴と 応用例

航空機搭載型スキャニングライダーは、飛行方向と直角にレーザービームによるスキャンを行いながら、対象各点までの距離を計測しながら飛行していく。そのため、樹冠の3次元構造データの取得が可能である。測距原理としては、Time of Flight法が用いられる。これは、レーザーが発射されて対象にあたり、それが散乱して再度ライダーに戻ってくるまでの時間を計測し、それを距離に換算する方式である。航空機搭載型スキャニングライダーは地上におけるレーザービーム径 (footprint) によって、大きく Large footprint タイプと Small footprint タイプの二つに分類できる。地上でのビーム径が数メートル以上のビームを照射する Large footprint タイプのスキャニングライダーでは、対象から反射して戻ってくるレーザーパルスの対象までの距離に応じた反射強度変化の波形をそのまま記録することが可能であり (Waveform recording type)、その波形を解析することにより樹冠の垂直構造の算出が試みられた (Means et al. 1999 : Lefsky et al. 2002)。この方法は広域の計測には向くが、数メートルの空間分解能であるため、個々の樹木レベルの詳細な垂直構造を計測するには適しているとはいえない。一方、地上でのビーム径が数10 cm程度の small footprint 航空機搭載型スキャニングライダーが商業ベースで広く一般に使用可能となってきた。このタイプのライダーの代表的なシステムの空間分解能は10～50 cm、精度は絶対座標の誤

差で50 cm以下、基準点 (地上に設置した固定点) からの相対座標の誤差で15 cm程度である。また、レーザーパルスの繰り返しも近年では100 KHz以上を得ることも可能で、そのため個々の樹木レベルの詳細な3次元画像を取得でき、これをもとに樹高やバイオマス、樹木の成長などが計測されるようになってきた (Omasa et al. 2000, 2003 : Hyyppä et al. 2001 : Brandtberg et al. 2003 : Holmgren and Persson 2004 : Næsset et al. 2004)。このような small footprint 航空機搭載型ライダーシステムは、比較的広い森林エリアをカバーでき、森林全体の群落構造計測に利用されている。しかし、樹冠上層部によってそれよりさらに奥にある樹冠内部が遮蔽されるため、樹冠内部にレーザービームを十分に到達させることは難しく、この装置を使ったLAD推定では過小評価が報告されている (Lovell et al. 2003)。また、本装置による計測は上空から行われるため、森林群落の下部構造や林床の情報を得ることは難しいが、得られたデータから回帰式を使い、群落下部の構造パラメータを推定する方法も報告されている (Næsset et al. 2004)。

可搬型スキャニングライダーの特徴と応用例

一方、固定点に設置して使用する可搬型スキャニングライダーを用いた森林計測も活発に行われるようになってきた (Hosoi and Omasa 2006, 2007 : Lefsky and Macale 2008 : Côté et al. 2009, 2011 : Hosoi et al. 2010 : Dassot et al. 2011)。本装置では航空機搭載型のような広域計測は難しいが、高い距離精度と空間分解能の3次元点群データを高速で取得可能である。装置自体の重量は数kg以下で、電源供給は小型のバッテリーでも行うことができるため、傾斜を伴う山地などにも比較的容易に機材を運び、調査地を設定することが可能である。したがって、本装置により森林のプロットレベルでの精密構造計測を効率よく行うことが可能である。森林計測でよく利用される可搬型スキャニングライダーの距離精度はおおよそ0.05～10 cmの範囲である。本装置の測距原理としては、航空機搭載型と同様な Time of Flight法に加え、レーザービームに変調をかけ、対象から戻ってきた反射ビームの位相差を測定し、距離に換算する位相差法を用いた装置もある (Dassot et al. 2011)。森林計測でよく利用される Time of Flight法に基づいた装置では、レーザービームの反射光の検出感度が高く、また距離精度も高いため、長距離でも高精度に安定した計測が可能となるが、高性能の検出素子が必要になるため、装置の価格が非常に高価になる。

一方、位相差法に基づいた装置では、価格は比較的安価に抑えられるが、樹木の葉や枝といった複雑で入り組んだ対象の場合、反射光の位相差が検出できずに欠落してしまう点が生じるという問題がある。その他、近距離計測（対象までの距離 10 m 以下）で mm オーダーの距離精度及び空間分解を可能にする三角測量を原理とする装置もある（Hosoi and Omasa 2006）。この方式の装置では、レーザー光源と CCD アレイからなる検出器はある既知の距離だけ離れた位置に組み込まれている。対象からの反射光は CCD アレイ上のある一つの CCD で検出され、その位置が記録される。この位置データをもとに、対象と光源の距離を三角測量の原理で算出する。可搬型スキャニングライダーでは、垂直方向と水平方向にレーザービームのスキャンがなされる。その方式としては、ライダーヘッド自体をサーボモーターで動かしてスキャンするタイプと、ライダー内部にガルバノミラーを内蔵し、ミラーを回転させてスキャンするタイプ、さらにはミラーとモーターを併用してスキャンするタイプなどがある。

可搬型スキャニングライダーを用いた森林計測の例としては、樹高計測や胸高直径計測などの高精度計測がある。また、可搬型スキャニングライダーにより計測された樹高や胸高直径から、材積式などの回帰式を用いて個々の樹木の材積やカーボンストックを推定する方法も報告されている（Omasa et al. 2002；Hopkinson et al. 2004）。こうした方法は森林構造計測の高精度化、高効率化に大きく貢献するものである。しかし、用いられる回帰式は場所や樹種、樹齢によって異なり、また、推定すべきパラメータ毎に異なる回帰式が必要となるといった点が問題となる。実際、必要な回帰式をそれぞれの対象や推定パラメータ毎に得ることは容易ではない。

可搬型スキャニングライダーでは、複雑な森林群落の形状をそのまま高空間分解能の 3 次元点群画像データとして記録可能である。そのデータには樹高や胸高直径の情報はもちろん、複雑な幹や枝の構造や葉の空間的な配置に関する情報まで、非常に多くの森林構造に関する情報が含まれている。そこで、可搬型ライダーデータから 3 次元画像処理の手法により樹木の 3 次元モデルを生成し、そのモデルから回帰式を使わず、直接構造パラメータを抽出しようという方法が、近年注目されている。その一つの方法に、樹木のポリゴンモデルによる方法がある（Omasa et al. 2008）。本方法では得られたライダーデータに対して、隣接する点同士を結んで三角形のメッシュを作成し、3 次元サーフェスモデルを作成する。一度サーフェスモデルが作成されれば、画像解析によって幹

の体積や表面積、さらにはスライスして樹冠断面積といった構造情報の算出が可能となる。しかし本方法では、葉の部分の点群を間引いてサーフェスを作る必要があり、葉の空間分布といった重要な情報をこのモデルから引き出すことは難しい。さらに樹木のような複雑な形状をもつ対象の場合、ポリゴンメッシュを作成すること自体、困難な場合が多い。別のアプローチとしては、スケルトンモデルによる方法がある（Côté et al. 2009, 2011；Dassot et al. 2011）。可搬型スキャニングライダーの点群データから、幹と枝の中心線であるスケルトンを抽出し、それをもとに葉の分布に応じて枝を追加、さらには樹冠内への光透過率等を加味して、シュートや葉を加えていくという方法である。本方法はライダーデータをベースに、実際の樹木の構造特性と整合性のあるモデルをコンピュータ上で作成していくものであり、実測データとの比較による精度検証も行われている（Côté et al. 2011）。一方、ライダーの複雑な 3 次元点群形状データをできる限り忠実にモデリングする方法として、ボクセルモデリング法がある（Hosoi and Omasa 2006, 2007；Hosoi et al. 2010, 2013）。ボクセルとは 3 次元格子点状の立方体を指し、3 次元の形状をコンピュータ上で表現する一つの方法である。2 次元におけるピクセルを 3 次元に拡張したものと捉えることができる。ボクセルモデルでは、ライダー計測により取得された点群は、座標変換によりボクセルに変換される。これにより、元の点群データはボクセル空間内の点の集合、すなわちボクセルエレメントの集合体として表現される。そのため、元の点群データの空間情報はほとんど失われることなく、複雑な群落構造も忠実に、かつ容易に 3 次元モデルとして再現される。それぞれのボクセルには属性（2 次元デジタル写真上のピクセルで例えるならピクセルの輝度やカラーなどがこれに相当）を付与することができ、個々のボクセルの属性値をもとに種々の演算を行い、必要な構造パラメータを抽出することができる。

事例紹介

筆者らは可搬型スキャニングライダーにより森林群落を計測し、得られた 3 次元データから、LAD の垂直分布や材積を推定する方法を検討してきた。その解析には先に述べたボクセルモデリング法が用いられている。ここではその事例について紹介する。

LADの垂直分布推定

植物の3次元構造を表す指標であるLADの垂直分布推定を目的とし、筆者らはVCP法(Voxel-based Canopy Profiling method)を考案した(Hosoi and Omasa 2006)。VCP法では、樹冠全体がもれなくライダーから発射されたレーザービームによって照射されるよう、樹冠を取り囲む複数の位置にライダーの計測点を設置し、計測を行う。さらにレーザーが樹冠の内部までなるべく到達できるように、入射するレーザービームの入射角(天頂角)の最適化を行う。各々の計測点から取得されたデータを共通の座標系に位置合わせ(レジストレーション)する。得られた位置合わせ後の3次元点群データをもとに、以下のようにボクセルモデリングを行う。まず、(1)式によって点群データをボクセル座標系に変換する。

$$i = \text{Int}\left(\frac{X - X_{\min}}{\Delta i}\right) + 1 \quad j = \text{Int}\left(\frac{Y - Y_{\min}}{\Delta j}\right) + 1 \quad k = \text{Int}\left(\frac{Z - Z_{\min}}{\Delta k}\right) + 1 \quad (1)$$

(i, j, k)はボクセル座標、 Int は最も近い整数に値を丸める関数、($X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min}$)はもとの座標系(X, Y, Z)の最小値、($\Delta i, \Delta j, \Delta k$)はボクセルエレメントのサイズである。エレメントのサイズはライダーの分解能や計測精度によって決定する。変換後のそれぞれのボクセルに属性値として1を与える。属性値が1とは、その場所でレーザービームが対象木に衝突したということを意味する。次に実際にライダー計測時に照射されたレーザービームの全光跡を、ボクセル空間の中でトレースする。あるボクセルが少なくとも1本以上のレーザービームと交わり、かつその属性が1でない場合、そのボクセルに属性値として2を与える。属性値2とは、その位置でレーザービームが1本以上通過したことを意味する。各ボクセルの属性値をもとに、以下の式によりLADを算出する。

$$\text{LAD}(h, \Delta H) = \frac{\cos \theta}{G(\theta)} \cdot \frac{1}{\Delta H} \sum_{k=m_h}^{m_{h+\Delta H}} \frac{n_1(k)}{n_1(k) + n_2(k)} \quad (2)$$

θ はレーザービームの天頂角、 ΔH は垂直方向の層の厚み、 m_h と $m_{h+\Delta H}$ は実際の高さ h と $h+\Delta H$ に相当するボクセル座標系での高さ方向の値、 $n_1(k)$ と $n_2(k)$ はそれぞれボクセルアレイ内で k の高さにある層の属性値1と2を持つボクセルの数である。項 $n_1(k)/(n_1(k) + n_2(k))$ は k の高さの層においてレーザービームが対象木に衝突した頻度の割合を表している。 $G(\theta)$ はレーザービームの方向と直交する平面への葉の投影面積の平均値である。 $\cos(\theta)/G(\theta)$ の項はレーザービーム入射角 θ におけるレーザービームの軌跡長と葉傾斜角分布の影響に関する補正項である。

本方法はまず孤立木(サザンカ: *Camellia sasanqua* T.)で検証され、高い精度のLAD垂直分布を与えることが可能であることが示された(平均相対誤差17.4%: Hosoi and Omasa 2006)。その後、本方法は広葉樹群落到適用された(Hosoi and Omasa 2007)。この実験は、茨城県つくばみらい市にある人工林で、2005年7月に樹高10~13mのケヤキ(*Zelkova serrata* (thunb.) Makino)群落を対象として行われた。4×8mの測定プロットを林床に設置し、そのプロットをさらに2×2mのコドラート8個に分割した。LADの実測は、ライダー測定後に測定プロットの上方5~13mの高さの領域を一個あたり2×2×0.5mのサイズのセルで計128個に分割し、各セルの内部に含まれる葉を採取し、面積を測定した。実測より、測定プロット内のケヤキ群落のLAIは4.59、平均LADは0.57 m²m⁻³であった。ライダーによる測定は、測定プロットを取り囲むよう6箇所の測定点を設置し、距離精度±8mmの可搬型スキヤニングライダーを使用して行った。レーザービームの中心入射角(レーザービームの垂直方向スキヤンの中心天頂角に相当)は47.2°, 57.8°, 71.3°, 90.0°の4水準とした。なお中心入射角90.0°では、高所作業車を使用し、可搬型スキヤニングライダーを高さ10mの位置に上げて計測を行った。図1(a)に中心入射角57.8°で測定されたケヤキ群落の3次元点群画像を示す。式(1)と(2)を用い、ボクセルモデリングを行って各セル毎にLADを計算し、コドラート単位でLADの垂直分布を算出した。幹や枝などの非同化器官は誤差の要因になるため、2006年2月の落葉期に同一対象を再度ライダーによって測定し、得られたデータを着葉期の2005年7月に測定したデータより差し引くことで、その分離を行った(図1(b)参照)。また、式(2)の計算に必要な葉傾斜角の分布については、約5mmの距離精度と空間分解能を持つもう一台の可搬型スキヤニングライダーにより群落を計測し、個々の葉が識別可能な高精度3次元点群画像を取得、ここから葉傾斜角分布を算出し(方法の詳細はHosoi and Omasa 2007参照)、式(2)に代入した(図2参照)。図3はLAD垂直分布の算出結果例である。ライダー計測地点に近いコドラートでは中心入射角によらず高い精度の結果が得られたのに対し(図3(a))、ライダー計測地点から遠い測定プロット中央部にあるコドラートでは90.0°以外の角度で過小評価になる傾向があった(図3(b))。ライダーポジションに近いコドラートではより多くのレーザービームが到達するものと考えられ、レーザービームの群落への入射数が、LADの精度に関係する要因の一つであることが推察された。各コドラートの

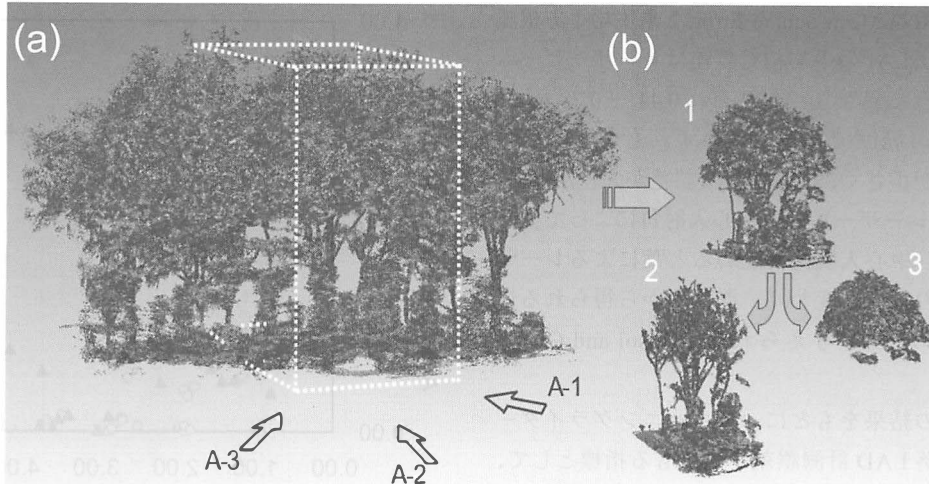


図1. 可搬型スキャングライダーにより得られたケヤキ群落の3次元点群画像（レーザー中心入射角 57.8° の場合。なお、レーザー中心入射角とはレーザービームの垂直方向スキャンの中心天頂角に相当。）(a) 全体図。点線は計測プロット、矢印は多方向スキャンの方向を示す。(b) 非同化器官（幹、枝）の分離。1は元の画像、2は分離された非同化器官と常緑の下層植生、3は分離された葉（Hosoi and Omasa 2007 より転載）。

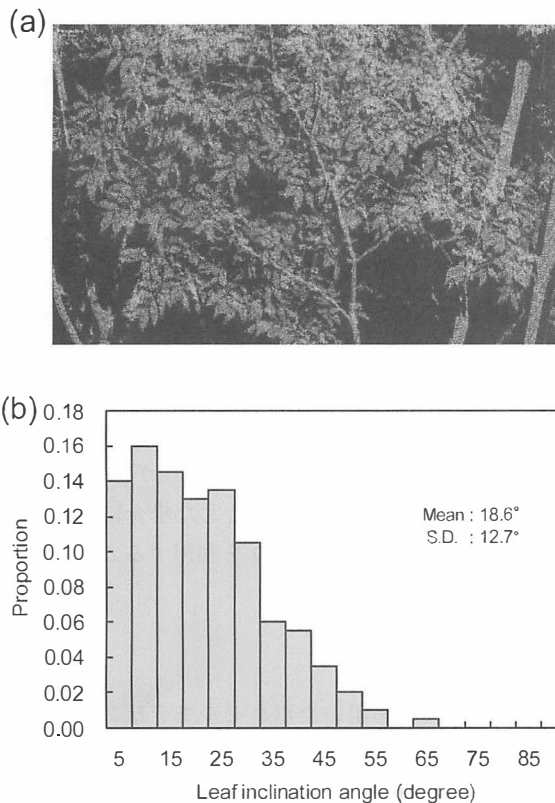


図2. 高空間分解能可搬型スキャングライダー計測による葉傾斜角分布の算出。(a) 取得された樹冠の一部の3次元点群画像。個々の葉が識別可能である（Hosoi and Omasa 2009 より転載）。(b) (a)をもとに算出したケヤキ群落の葉傾斜角分布。Meanは平均値、S.D.は標準偏差を示す（Hosoi and Omasa 2007 より転載）。

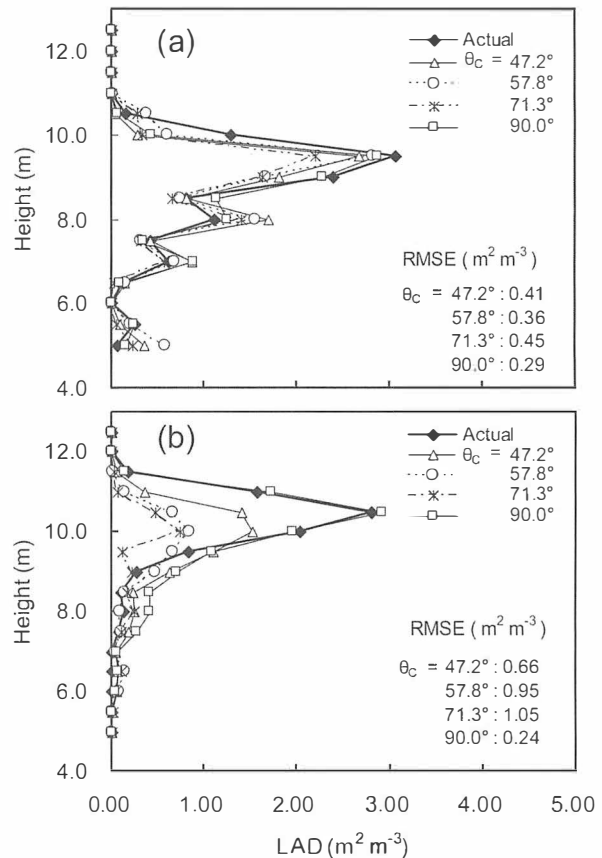


図3. 可搬型スキャングライダー計測により算出されたLAD垂直分布の例。(a) ライダー計測地点に近いコドラート。(b) ライダー計測地点から遠い測定プロット中央部のコドラート。 θ_c はレーザービームの中心入射角、RMSEは2乗平均平方根誤差を示す（Hosoi and Omasa 2007 より転載）。

LADのRMSE (Root Mean Square Error; 2乗平均平方根誤差)の平均値及びLAIの平均相対誤差はレーザービーム中心入射角によって異なり、それぞれ0.44~0.78 m^2m^{-3} と12.7~57.0%の範囲であった。いずれも中心入射角90.0°が最も誤差が小さく、71.3°が最も誤差が大きかった。LAD推定精度がレーザービーム中心入射角によって変わる理由としては、中心入射角が変わると葉によるレーザービームの遮蔽の程度が変わり、群落内から得られる情報量も変化するためと考えられる (Hosoi and Omasa 2007)。

上記誤差要因の結果をもとに、スキャニングライダーによる広葉樹群落LAD計測誤差を見積もる指標として、対象群落の構造パラメータとライダーのレーザービーム照射に関する設定を関連させた指標 Ω (Laser beam coverage index)を考案した (Hosoi et al. 2010)。

$$\Omega = A_{beam} \times N \exp(-K \times LAI_{cum}) \quad (3)$$

ここで A_{beam} 、 N 及び K はそれぞれ計測プロットに入射するレーザービームの面積 (m^2) (スポットの水平面への投影面積)、入射密度 (shots/ m^2) 及び消散係数を表し、 LAI_{cum} はライダーデータから計算される各高さの積算葉面積指数を表す。ここで積算葉面積指数は通常、群落最上面からある高さまでの葉面積密度を高さ方向に積分して得られるものである。上空からビームを照射する航空機搭載型スキャニングライダーの場合はこの定義に従うが、地上設置の可搬型スキャニングライダーの場合は、地上からある高さまでの葉面積密度の積分値を積算葉面積指数として取り扱う。 A_{beam} と N はライダーのレーザービームの設定に関わる変数であり、 LAI_{cum} は群落構造に関わる変数、 K はライダーの設定と群落構造の両方に関わる変数である。この指標は対象群落のある水平断面がレーザービームに照射される割合を表している。値が1以上の場合、ビームがもれなく対象断面を照射していることを示し、値が1より小さい場合、レーザービームがカバーしきれていない領域が対象の断面に存在することを示す。図4に Ω とLAD推定の絶対誤差との関係を示す。 Ω が2を下回ると誤差が急激に増大し、2を超えると誤差は減少していくことが示されている。ビームが水平断面をカバーする割合が増すほどに群落内部から得られる情報量が増し、精度が向上するものと考えられる。ここで Ω の値が1以上ではなく、2より大きい場合に誤差が減少する理由としては、ビームが重複して当たる領域が存在するためと考えられる。実用上は Ω が2を大きく上

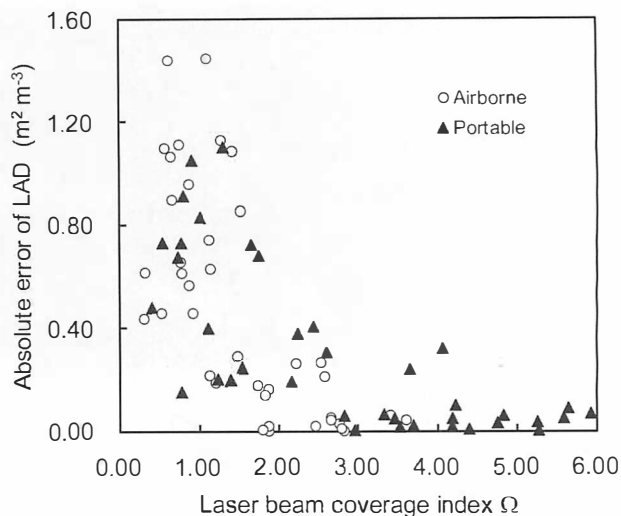


図4. ケヤキ群落における Laser beam coverage index Ω とライダーによるLAD推定値の絶対誤差との関係。○は航空機搭載型、▲は可搬型スキャニングライダーの例 (Hosoi et al. 2010より転載)。

回れば、LAD推定値の精度が保障されるといえる。さらに図4には、同一エリアを航空機ライダーで計測した場合のLAD推定値と Ω との関係も示してある。その傾向は可搬型と同様に Ω が2を下回ると誤差が増加した。このことから、計測条件の全く異なるライダーであっても、本指標は共通に使用できる可能性のある指標であることが示された。本指標は、実測を行わなくとも得られたLAD推定値の精度をある程度推定できるメリットがある。また、群落の構造によって K や LAI_{cum} は様々に変化するが、 Ω が2より大きくなるようにライダーの測定条件にかかわる A_{beam} や N を調整すれば精度が保たれるため、様々な構造を有する群落を対象とした場合にライダーの測定条件を決める指針として Ω を利用することも可能である。

材積の推定

ライダーデータを用いたボックスモデリングは、森林群落の材積推定にも活用可能である (Hosoi et al. 2013)。この方法は従来の材積式を利用する方法とは全く異なる。本方法では、可搬型スキャニングライダーから得た点群データをまずはボックス化し、その後、幹や枝の内部をボックスで埋めていく (このように内部が充填したモデルは一般に、ソリッドモデルと言われる)。得られたボックスソリッドモデルより、ボックス数をカウントすることで、任意の部位の体積を正確に算出することが可能と

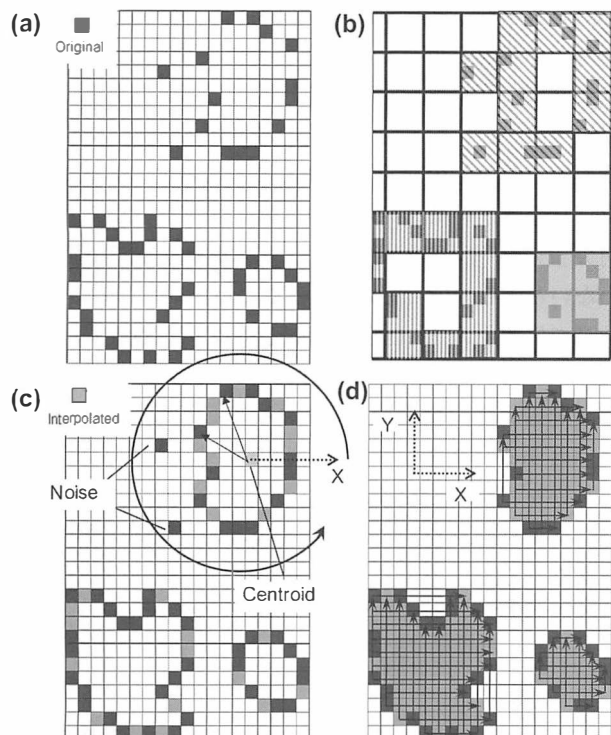


図5. ボクセル空間におけるある水平断面において、幹と枝の外周と内部をボクセルにより充填していく様子。(a) ライダー点群データから変換されたボクセル。(b) ボクセルサイズよりも大きなグリッドを重ね合わせた場合。同一のハッチングのあるグリッド内のボクセルは、同じ幹もしくは枝に属していることを示す。(c) 幹、枝の外周を線形補間により充填していく様子。(d) 幹、枝の内部をボクセルで充填していく様子 (Hosoi et al. 2013 より転載)。

なる。以下にその詳細を述べる。

まず、幹と枝のみのデータを得るため、落葉期に多方向からライダー計測を行う。得られたデータから (1) 式を使用したボクセル化までは、上述した LAD 推定方法と同じである。その後、レーザービームの径と同じかそれ以下の直径を持つ枝 (small branch) は、それよりも太い枝 (large branch) 及び幹から分離される。Large branch と幹については、図5に示すように、水平断面ごとに処理が行われる。まず、各ボクセルがどの枝や幹に属しているかを判定するため、図5(b)のように、ボクセルサイズよりも大きなグリッドを重ねる。グリッド内に一個でもボクセルがあれば、グリッドをマーキングする。マーキングされたグリッドは、各枝と幹の外周に閉曲線を描き、各閉曲線に含まれるボクセルを、個々の枝、幹に属するボクセルと判定する。次に各枝、幹に含まれるボクセルごとに、ボクセルとボクセルの間を線形補間し、幹・枝

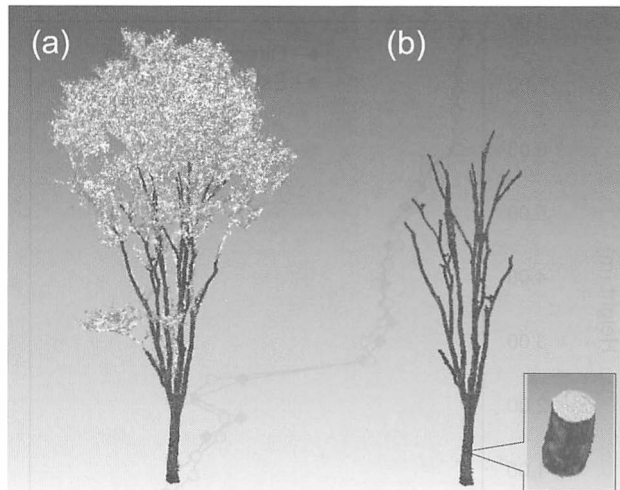


図6. 可搬型スキャニングライダーデータより生成したケヤキのボクセルソリッドモデル。(a) 全体図。グレーの部位は幹と Large branches、白の部位は Small branches を示す。(b) 幹と Large branches のみを示した図。右下にあるのは幹の断面の拡大図で、内部の白い部分が充填されたボクセルを示す (Hosoi et al. 2013 を改変)。

の外周を形成するボクセルがすべて連結された状態にし、ボクセルによって閉曲線を形成する (図5(c))。最後にボクセルの各閉曲線の内部をさらにボクセルで充填する (図5(d))。この工程をすべての水平断面で行うことにより、large branch と幹の内部がボクセルによって充填される。充填された large branch と幹に、先に分離された small branch をマージ (統合) することで、樹木全体のボクセルソリッドモデルが完成する。このモデルから体積を算出したい部位を選び、その部位に含まれるボクセル数をカウントし、得られたボクセル数にボクセル一個あたりの体積を乗じることで、その部位の体積を算出することが可能となる。図6は本方法より得たケヤキのボクセルソリッドモデルの例である (LAD 推定を行ったものと同一の対象)。図7は幹と large branch の一部に関して、実測値と本方法による体積推定値を比較したものである。平均相対誤差は 6.8% であり、本方法により、高い精度の材積推定が可能であることが示された。既往の可搬型スキャニングライダーの研究では、幹や枝の断面形状を楕円に近似し、体積算出を行う方法が報告されているが (Lefsky and McHale 2008)、こうした方法は高齢樹のように幹や枝が複雑な形状で、その断面が楕円とは大きく異なる対象では、誤差が大きくなる。本方法ではソリッドモデリングによってその内部をボクセルで充填し、ボクセルの数から幹、枝の体積を算出するため、断面形状の

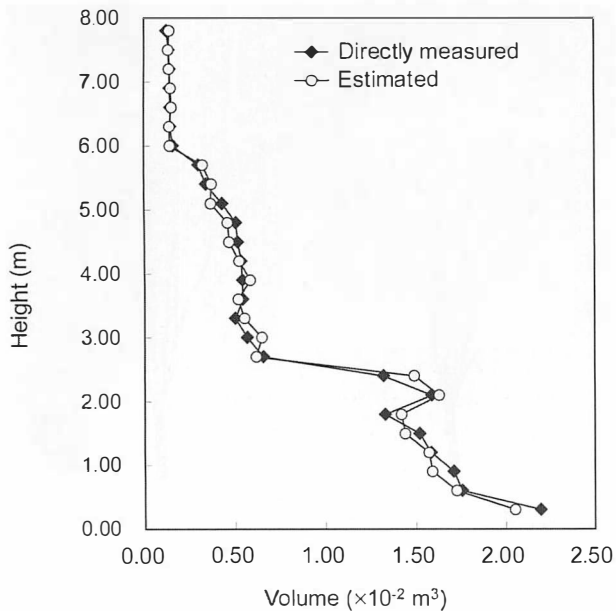


図7. ケヤキのボクセルソリッドモデルから算出された高さ毎の材積（幹と枝の一部）の推定値と実測値を比較した図（Hosoi et al. 2013 より転載）。

近似は必要なく、幹・枝が複雑な形状であっても、正確に体積を算出することが可能である。そのため、本方法は多様な形状の森林群落に対応可能であると考えられる。

スキャニングライダーによる森林計測の問題点

スキャニングライダーによる計測では、対象群落の周りや対象群落内の枝や葉により、それよりさらに奥にある枝や葉が遮蔽され、レーザービームが対象領域全体に供給されず、その3次元構造情報が十分に取得できない場合がある（Hosoi and Omasa 2007；Dassot et al. 2011）。本稿の事例では、LAD 推定結果の図 3(b) がこれに相当する。対策としては、複数の反射パルスを記録可能な装置や、反射パルスの波形をまるごと記録し解析する装置を使用し、より多くの反射点情報を取得する方法がある（Strahler et al. 2008）。また、可搬型の場合は、計測地点の数を増やす、群落構造に合わせたレーザービーム入射角の適正化などが対策となる。しかし、こうした対策を講じても、遮蔽の問題を完全に解決することは現状では難しく、効果的な対策が望まれる。さらに風によって対象が動き、構造パラメータ推定に誤差が生じる問題がある。この問題については、風がなるべく弱い状態での計測が基本的な対策になるが、近年入手可能なスキャンスピードの速い装置（数分～10分程度で垂直方向±180°、水平方向

360°をスキャン可能な装置も市販されている）を選択し、風のない状況を狙って素早くデータ取得するという方法をとれば、効率よく対処できるものと考えられる。また推定するパラメータ毎に、その精度が風によってどの程度影響を受けるのかを考慮することも重要である。例えば、高分解能可搬型スキャニングライダーによる葉傾斜角分布の計測（図2）などは、基本的に無風で計測を行わないと、その分布を算出することは困難である。一方、前章で解説したLAD 推定に関しては、LAD を算出するセルのサイズと比べ、風による葉の動きが小さければ、風に起因する誤差をあまり気にする必要はない。推定しようとするパラメータに毎にどの程度の風まで許容されるのかを把握しておき、実際のフィールドの風の状態から、計測可否を判断することも現実的な対応策であると考えられる。

おわりに

本稿では、スキャニングライダーを用い、森林群落の構造パラメータを求めるための3次元リモートセンシングについて紹介した。これらの方法では、森林の3次元情報を効率よく高精度に取得し、その情報を基に森林の構造パラメータを算出するため、従来の方法よりも精度と計測効率の点で優れている。近年のスキャニングライダーの性能向上は著しく、特に可搬型では、スキャン速度や計測可能距離、反射パルスの記録方式などの性能向上により、より多くの森林群落情報を、広い範囲にわたって短時間で得ることが可能となってきた。こうした最新の装置も利用しながら、様々なフィールドでの検証を行うことで、スキャニングライダーによる森林構造計測法を発展させていくことが望ましい。

引用文献

- Brandtberg T, Warner TA, Landenberger RE, McGraw JB (2003) Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85:290-303
- Côté JF, Fournier RA, Egli R (2011) An architectural model of trees to estimate forest structural attribute using terrestrial LiDAR. *Environmental Modeling & Software*, 26:761-777
- Côté JF, Widlowski JL, Fournier RA, Verstraete MM (2009) The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. *Remote Sensing of Environment*, 113:1067-1081

- Dassot M, Constant T, Fournier M (2011) The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science*, 68:959-974
- Goward SN, Williams DL (1997) Landsat and Earth Systems Science: Development of terrestrial monitoring. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63:887-900
- Holmgren J, Persson Å (2004) Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90:415-423
- Hopkinson C, Chasmer L, Young-Pow C, Treitz P (2004) Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 34:573-583
- Hosoi F, Nakai Y, Omasa K (2010) Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48:2215-2223
- Hosoi F, Nakai Y, Omasa K (2013) 3-D voxel-based solid modeling of a broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82:41-48
- Hosoi F, Omasa K (2006) Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44:3610-3618
- Hosoi F, Omasa K (2007) Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf-area-density profile using 3D portable lidar imaging. *Journal of Experimental Botany*, 58:3464-3473
- Hosoi F, Omasa K (2009) Estimating vertical leaf area density profiles of tree canopies using three-dimensional portable scanning lidar. In: *Proceedings of Laserscanning '09*: ISPRS Vol. 38 prt 3/W8, -pp.152-157
- Hyypä J, Kelle O, Lehtikoinen M, Inkinen M (2001) A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39:969-975
- Lefsky MA, Cohen WB, Parker GG, Harding DJ (2002) Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, 52:19-30
- Lefsky M, McHale M (2008) Volume estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Remote Sensing* 2: doi: 10.1117/1.2939008
- Lovell JL, Jupp DLB, Culvenor DS, Coops NC (2003) Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29:607-622
- Means JE, Acker SA, Harding DJ, Blair JB, Lefsky MA, Cohen WB, Harmon ME, McKee WA (1999) Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 67:298-308
- Næsset E, Gobakken T, Holmgren J, Hyypä H, Hyypä J, Maltamo M, Nilsson M, Olsson H, Persson Å, Söderman U (2004) Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19:482-499
- Omasa K, Akiyama Y, Ishigami Y, Yoshimi K (2000) 3-D remote sensing of woody canopy heights using a scanning helicopter-borne lidar system with high spatial resolution. *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 20:394-406
- Omasa K, Urano Y, Oguma H, Fujinuma Y (2002) Mapping of tree position of *Larix leptolepis* woods and estimation of diameter at breast height (DBH) and biomass of the trees using range data measured by a portable scanning lidar. *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 22:550-557
- Omasa K, Qiu GY, Watanuki K, Yoshimi K, Akiyama Y (2003) Accurate estimation of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. *Environmental Science & Technology*, 37:1198-1201
- Omasa K, Hosoi F, Konishi A (2007) 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *Journal of Experimental Botany*, 58:881-898
- 大政 謙次, 細井 文樹, 中井 洋平 (2009) 3次元リモートセンシングによる森林の構造的特徴量の計測、遺伝、11月号:44-50
- Omasa K, Hosoi F, Uenishi TM, Shimizu Y, Akiyama Y (2008) Three-dimensional modelling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning LIDAR remote sensing. *Environmental Modeling and Assessment*, 13:473-481
- Papathanassiou KP, Cloude SR (2001) Single-baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39:2352-2363
- Strahler AH, Jupp DLB, Woodcock CE, Schaaf CB, Yao T, Zhao F, Yang X, Lovell J, Culvenor D, Newnham G, Ni-Miester W, Boykin-Morris W (2008) Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34:426-440
- Zhao K, Popescu S, Meng X, Pang Y, Agca M (2011) Characterizing forest canopy structure with lidar composite metrics and machine learning. *Remote Sensing of Environment*, 115:1978-1996
- Welles JM, Cohen S (1996) Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany*, 47:1335-1342